



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA APLICADA NA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO**

CARLOS DIMITRI BERNARDO NASCIMENTO

POMBAL - PB

2023

CARLOS DIMITRI BERNARDO NASCIMENTO

INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA APLICADA NA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a): Prof. Leovegildo Douglas Pereira de Souza

POMBAL - PB

2023

N244i Nascimento, Carlos Dimitri Bernardo.

Interação solo-estrutura aplicada na análise de estabilidade global de um edifício / Carlos Dimitri Bernardo Nascimento. – Pombal, 2023. 33 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2023.

“Orientação: Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza”.
Referências.

1. Análise estrutural. 2. Estabilidade global. 3. Interação solo-estrutura. I. Souza, Leovegildo Douglas Pereira de. II. Título.

CDU 624.01 (043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.

CARLOS DIMITRI BERNARDO NASCIMENTO

INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA APLICADA NA ANÁLISE DE ESTABILIDADE GLOBAL DE UM EDIFÍCIO

Trabalho de Conclusão de Curso do discente CARLOS DIMITRI BERNARDO NASCIMENTO **APROVADO** em 27 de novembro de 2023 pela comissão examinadora composta pelos membros abaixo relacionados como requisito para obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL pela Universidade Federal de Campina Grande.

Registre-se e publique-se.



Assinado digitalmente por LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA.08419377457
CN=LEOVEGILDO DOUGLAS PEREIRA DE SOUZA.08419377457,
OU=UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu atesto a precisão e a integridade deste documento
Localização: Pombal - PB
Data: 2023.12.02 07:12:15-03'00"
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.1

Prof. Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza
(Orientador – UFCG)

Prof. Luiz Ricardo da Silva Linhares
(Membro Interno – UFCG)

Engenheiro Geyellyson Jordan Silva Lima
(Membro Externo)

Dedico este trabalho de conclusão de curso a minha amada mãe, Kelina Bernardo Silva, cujo amor incondicional e dedicação incansável moldaram não apenas a minha vida pessoal, mas também a minha jornada acadêmica. Ela é um farol de inspiração, uma educadora exemplar e o alicerce do meu sucesso educacional. Minha mãe nunca mediu esforços para me proporcionar um ensino de qualidade durante toda a minha vida, e mais do que isso, ela foi o meu exemplo acadêmico, mostrando-me a importância do conhecimento e da dedicação. Este trabalho é uma pequena homenagem à mulher extraordinária que ela é, e é uma expressão da eterna gratidão por tudo que ela fez por mim. Obrigado, mãe, por ser a minha maior incentivadora e por me ensinar que o conhecimento é a chave para um futuro brilhante.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela concessão da saúde que me ajudou a percorrer minha trajetória acadêmica e realizar este trabalho com sucesso.

Expresso minha profunda gratidão ao meu estimado professor e orientador, Dr. Leovegildo Douglas Pereira de Souza, pelo seu comprometimento e amizade que desempenhou um papel crucial na conclusão deste trabalho.

À minha instituição de ensino, a Universidade Federal de Campina Grande, e a todos os seus funcionários dedicados, manifesto meu reconhecimento pelo ambiente propício fornecido à minha formação acadêmica.

Aos meus valiosos amigos, com os quais compartilhei uma jornada acadêmica repleta de companheirismo e enriquecimento mútuo, agradeço por contribuir para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu querido filho, Carlos Dominic Saldanha Nascimento, expresso minha gratidão por ser minha fonte constante de alegria e inspiração.

Por último, mas não menos importante, expresso minha sincera gratidão a todos os meus familiares, cujo apoio e cuidado foram fundamentais para que eu pudesse cumprir com minhas obrigações acadêmicas e alcançar este marco significativo em minha vida.

“Engenharia é a arte de moldar materiais que não compreendemos totalmente, em formas que não podemos analisar com precisão, de modo a resistir a forças que não podemos avaliar adequadamente, de tal forma que o público não tenha motivos para suspeitar da extensão da nossa ignorância.”

Dr. A.R. Dykes, Instituição Britânica de Engenheiros Estruturais, 1976.

Interação solo-estrutura aplicada na análise de estabilidade global de um edifício

Soil-structure interaction applied in the global stability analysis of a building

Carlos Dimitri Bernardo Nascimento, eng.carlosdimitri@gmail.com

Leovegildo Douglas Pereira de Souza, leovegildo.douglas@professor.ufcg.edu.br

RESUMO

O avanço tecnológico na engenharia estrutural tem viabilizado a construção de edifícios cada vez mais esbeltos. Essa acentuação de esbeltez aumenta a vulnerabilidade do edifício às forças horizontais, demandando uma análise complexa de estabilidade global. Sendo assim, na busca por um modelo estrutural mais refinado, se faz relevante considerar, além do vento, a interação solo-estrutura (ISE) nesta análise. O surgimento de softwares especializados em incorporar a ISE em projetos de estruturas, confirma a importância dessa abordagem. Logo, o presente estudo buscou analisar o quanto a incorporação da ISE pode afetar a estabilidade global de um edifício modelo de múltiplos pavimentos. Contudo, como resultado, notou-se variações de coeficientes de estabilidade global pouco expressivas. Porém, estas variações apontam uma redistribuição de esforços na estrutura, tornando esta análise pertinente no cálculo dos elementos estruturais do mesmo modelo.

Palavras-chave: Análise estrutural, estabilidade global, interação solo-estrutura.

ABSTRACT

Echnological advances in structural engineering have enabled the construction of increasingly slender buildings. This accentuation of slenderness increases the building's vulnerability to horizontal forces, requiring a complex analysis of global stability. Therefore, in the search for a more refined structural model, it is important to consider, in addition to wind, soil-structure interaction (ISE) in this analysis. The emergence of software specialized in incorporating ISE into structural designs confirms the importance of this approach. Therefore, the present study sought to analyze how much the incorporation of ISE can affect the global stability of a multi-story building model. However, as a result, insignificant variations in global stability coefficients were noted. However, these variations indicate a redistribution of efforts in the structure, making this analysis relevant in the design of the structural elements of the same model.

Keywords: Structure analysis, global stability, soil-structure interaction.

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica no campo da engenharia estrutural ao longo das últimas décadas é testemunho de um progresso notável, exercendo um impacto de grande significado na maneira como concebemos e avaliamos as estruturas. Como indicado por Moncayo (2011), "os avanços na tecnologia de materiais têm proporcionado a disponibilidade de concretos mais resistentes no mercado, permitindo a construção de edificações com estruturas mais esbeltas". Conseqüentemente, em harmonia com o aumento da demanda populacional, a tendência à verticalização dos centros urbanos tem se tornado cada vez mais proeminente.

Definido por Benevolo (2001) como "um segmento de ocupação do solo urbano caracterizado pela presença de edifícios que agregam uma maior quantidade de área construída numa determinada área de uma cidade", a verticalização, embora acompanhada de vantagens econômicas e sociais notáveis, exige um destaque particular para o aumento significativo da vulnerabilidade dessas estruturas às forças horizontais, à medida que se tornam mais esbeltas.

Barboza, Diniz e Lages (2019) enfatizam que o número crescente de edifícios altos e esbeltos reforça a necessidade de análises abrangentes da estabilidade global das estruturas. A norma NBR 6118:2023, no item 11.4.1.2 "Ação do vento", aborda a necessidade da consideração dos esforços induzidos pela ação do vento nas edificações. A análise desses esforços pode implicar em avaliações complexas da estabilidade das edificações, onde os deslocamentos horizontais gerados por esses esforços resultam nos efeitos de segunda ordem na estrutura. Kimura (2018) acentua que a análise da estabilidade global em construções de concreto armado exige uma abordagem holística, com restrições específicas a serem consideradas para compreender o comportamento da estrutura em face dos efeitos de segunda ordem, como as configurações α (Alfa), γZ (Gama Z) e o processo $P-\Delta$ (P-delta).

Entretanto, a análise como um todo da estabilidade global não se resume apenas à consideração dos efeitos de segunda ordem, se faz pertinente incorporar a avaliação do comportamento do solo e a compreensão da interação solo-estrutura (ISE) ao estudo. Segundo Holanda (1998), as deformações no solo afetam o comportamento da estrutura, podendo resultar em patologias nas edificações, como fissuração e esmagamento de pilares, destacando assim, a conexão intrínseca entre o desempenho estrutural e a interação com o solo. Além disso, a norma NBR 6122:2019 no item 5.5, "Análise de interação fundação-estrutura", dita a obrigatoriedade desta análise para os casos de estruturas nas quais a carga variável é significativa em relação à carga total, tais como silos e reservatórios, estruturas com mais de 55,0 m de altura, medida do térreo até a laje de cobertura do último piso habitável, relação altura/largura (menor dimensão) superior a quatro e fundações ou estruturas não convencionais.

Aprofundar o conhecimento das características do solo possibilita a experiência de sua capacidade de suporte e uma compreensão mais abrangente de seu comportamento deformável não-linear sob uma variedade de cargas que operam sobre a estrutura, conforme enfatizado por Correia (2004). Além disso, a obtenção precisa dos parâmetros de deformabilidade do solo conferem uma maior qualidade de dimensionamento, incorporando a estrutura maior funcionalidade e eficiência, pela possibilidade de previsão do comportamento do solo em diferentes cenários.

Desse modo, o objetivo deste trabalho é contribuir para a compreensão dos efeitos dessa interação fundamental, demonstrando o caminho a ser seguido para incorporar a ISE em projeto e interpretar os resultados atingidos pela mesma nos cálculos de estabilidade global, buscando com isso aprimorar a integridade e a resiliência dos projetos de estrutura, proporcionando um avanço neste campo da engenharia civil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estabilidade Global

Para Paixão e Alvez (2016), a avaliação da estabilidade global de um edifício representa uma das etapas mais críticas da análise estrutural, uma vez que visa garantir a segurança diante da possibilidade de perda da capacidade de resistência aos acréscimos de tensões e deformações, decorrentes das ações horizontais e verticais que operam sobre a estrutura. Kimura (2018) afirma que a estabilidade global de uma estrutura é inversamente proporcional à sua sensibilidade perante os efeitos de segunda ordem. Gonçalves (1993), enfatiza que a perda de estabilidade é um fenômeno intrinsecamente não linear, portanto, para obter precisão o comportamento do sistema estrutural, torna-se imperativo conduzir uma análise não linear.

2.2 Analise não-linear

Conforme destacado por Kimura (2018), uma análise não linear se refere a um método de design não qual a resposta de uma estrutura, seja em termos de deslocamentos, esforços ou tensão, manifesta um comportamento não proporcional em relação ao carregamento aplicado sobre ela. Esse tipo de comportamento é característico em estruturas de concreto armado e deve ser sempre incorporado durante uma análise estrutural para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados. "Incluir o tratamento não-linear do concreto se traduz em maior confiabilidade dos resultados nos estudos das deformações". (HEINNRICHS, 2003)

De modo geral, um modelo não linear, como observado por Neto (2013), envolve duas considerações principais: a não linearidade física, que aborda as características intrínsecas dos materiais, e a não linearidade geométrica, que lida com as variações nas formas e configurações das estruturas ao longo da análise. "Condições de equilíbrio, de compatibilidade e de ductibilidade devem ser necessariamente satisfeitas. Análises não lineares podem ser adotadas tanto para verificações de estados-limites últimos como para estados-limites de serviço." (NBR 6118:2023)

2.2.1 Não linearidade física (NLF)

A não linearidade física do concreto é um fenômeno intrínseco a esse material. A característica fundamental que simboliza essa não-linearidade é o seu módulo de elasticidade, um parâmetro mecânico que executa um papel crítico no comportamento estrutural do concreto.

A figura 1 (a), exemplifica graficamente um comportamento linear, ou seja, para qualquer intensidade de tensão (σ_1 , σ_2 e σ_3), a resposta do concreto é a mesma, pois o módulo de elasticidade (E_c) é constante. Em contrapartida, a figura 1 (b), demonstra um comportamento não-linear, em que para diferentes tensões (σ_1 , σ_2 e σ_3), a resposta do concreto também será diferente, pois para estas tensões encontram-se diferentes módulos de elasticidade (E_{c1} , E_{c2} e E_{c3}).

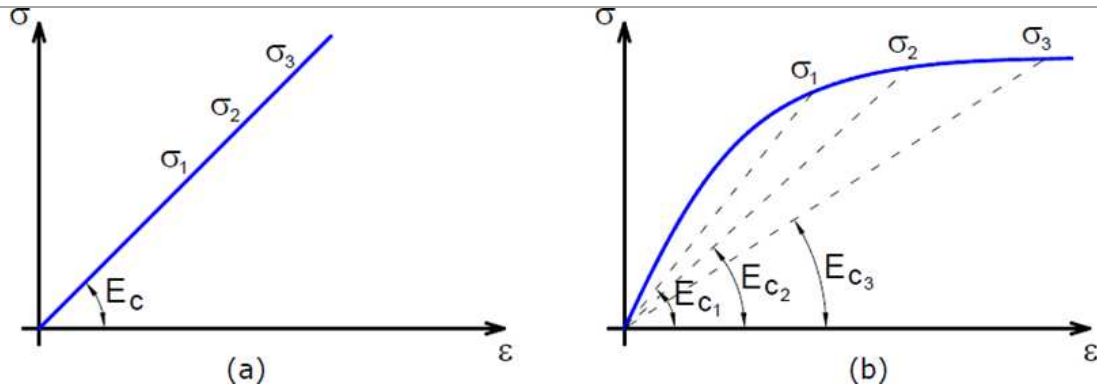


Figura 1 - Diagramas de tensão deformação. (Fonte: Moncayo; 2011)

A NBR 6118:2023, no item 15.7.3 (Consideração aproximada da não linearidade física), “para a análise dos esforços globais de segunda ordem, em estruturas reticuladas com no mínimo quatro andares, pode ser considerada a não linearidade física de maneira aproximada”. Para tal, deve-se tomar como rigidez dos elementos estruturais os valores:

- Lajes: $(EI)_{sec} = 0,3 E_c \cdot I_c$;
- Vigas: $(EI)_{sec} = 0,4 E_c \cdot I_c$ para $A_s' \neq A_s$ e $(EI)_{sec} = 0,5 E_{ci} \cdot I_c$ para $A_s' = A_s$;
- Pilares: $(EI)_{sec} = 0,8 E_c \cdot I_c$.

onde:

$(EI)_{sec}$ = Rigidez secante;

E_c = módulo de elasticidade tangente;

I_c = momento de inércia da seção bruta de concreto, incluindo, quando for o caso, as mesas colaboradoras;

A_s' = área de aço negativa;

A_s = área de aço positiva.

2.2.2 Não linearidade geométrica (NLG)

“A não linearidade geométrica é quando ocorre a perda da linearidade entre as relações de deslocamento e deformação, levando a estrutura a grandes mudanças na geometria e necessitando de reformular as equações de equilíbrio iniciais” (MACIEL, 2016). Para Stramandinoli (2007), a não linearidade geométrica de uma estrutura ocorre devido à influência do deslocamento da mesma, ou seja, a mudança de posição da estrutura no espaço. Esse efeito gera uma nova configuração de estabilidade, gerando nova distribuição de esforços.

Na Figura 2 uma barra engastada na base e livre na extremidade, submetida a uma força horizontal (F_H), muda de posição deformando-se no sentido em que a força é aplicada e mudando a sua geometria. “Quando se analisa o equilíbrio na posição deformada é que os efeitos da não-linearidade geométrica são determinados.” (NETO, 2013).



Figura 2 - Barra vertical com mudança de posição no espaço. (Fonte: Moncayo; 2011)

Para Kimura (2018), os efeitos resultantes da NLG acabaram levando a acréscimos intensos nas tensões na estrutura, sendo de grande importância levar em conta seus impactos ao analisar a estabilidade global de estruturas construídas em concreto armado.

2.3 Efeitos de reação nas estruturas

2.3.1 Efeitos de primeira ordem

Segundo Feitosa e Alves (2015), análise de 1ª ordem, é aquela em que o cálculo da estrutura é realizado em uma configuração geométrica não deformada. Os valores de tensão e deformação do sistema são obtidos a partir das formulações clássicas da resistência dos materiais.

Retomando como exemplo a barra vertical engastada e livre, submetida a força vertical (F_H) da figura 2, porém, agora considerando uma força vertical (F_V) atuando em seu topo (figura 3).

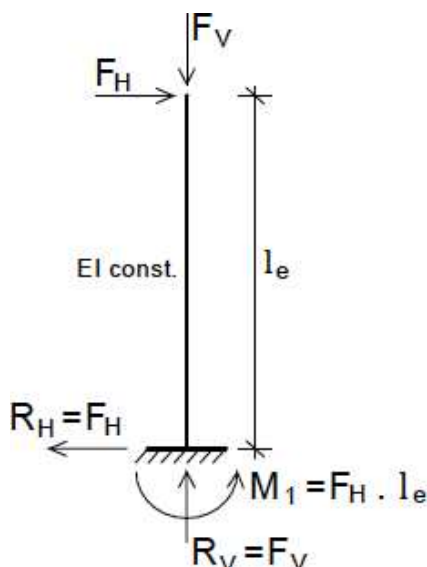


Figura 3 - Reações na barra vertical indeformada (Fonte: Moncayo; 2011)

Percebe-se, que para tal estrutura se mantenha em equilíbrio na posição inicial, de forma indeformada, surgem reações na base engastada da barra, dentre estas, está o momento fletor de 1ª ordem (M_1), que será igual a força horizontal (F_H) multiplicada pelo comprimento (l_e).

2.3.2 Efeitos de segunda ordem

Para Feitosa e Alves (2015), ao se considerar uma configuração geométrica deformada surge no sistema solicitações adicionais denominadas de efeitos de 2ª ordem. Conforme definido por Ceccon, Leopoldo e França (2008), os efeitos de 2ª ordem são aqueles que se somam aos obtidos numa análise de 1ª ordem, quando a análise do equilíbrio passa a ser efetuada considerando a configuração deformada da estrutura. Quanto mais esbelta for a peça, maior será a importância de sua consideração na determinação desses efeitos deve ser considerado o comportamento não linear dos materiais.

Prosseguindo a sequência, a contínua ação da força horizontal, a extremidade livre será deslocada, sendo assim, para garantir o equilíbrio do sistema, um acréscimo de momento igual a Força vertical (F_V) multiplicada pela distância deformada da extremidade livre em relação à posição inicial (u) será gerado na base engastada, este, chamado de momento de 2ª ordem. Por fim, na extremidade da barra, o momento resistente atuante será a soma dos momentos de primeira e segunda ordem, (figura 4).

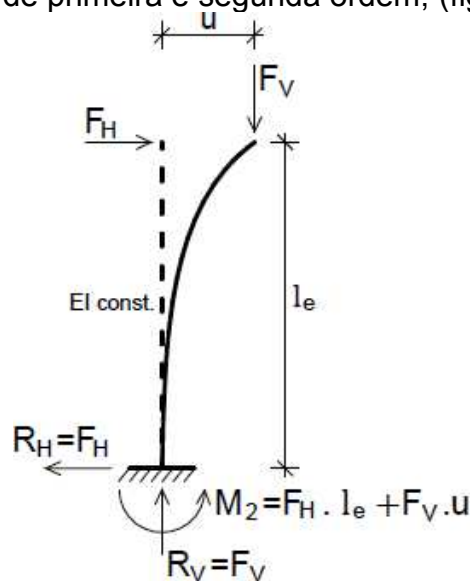


Figura 4 - Reações na Barra Vertical Deformada (Fonte: Moncayo; 2011)

Aplicando esses conceitos a representações de estruturas reais (figura 5), é possível observar que as forças horizontais se referem às forças laterais aplicadas ao edifício, como o vento, enquanto as forças verticais correspondem ao peso próprio das estruturas, por exemplo. Posteriormente, pode-se visualizar uma representação exagerada dos deslocamentos e, conseqüentemente, a manifestação dos efeitos de segunda ordem.

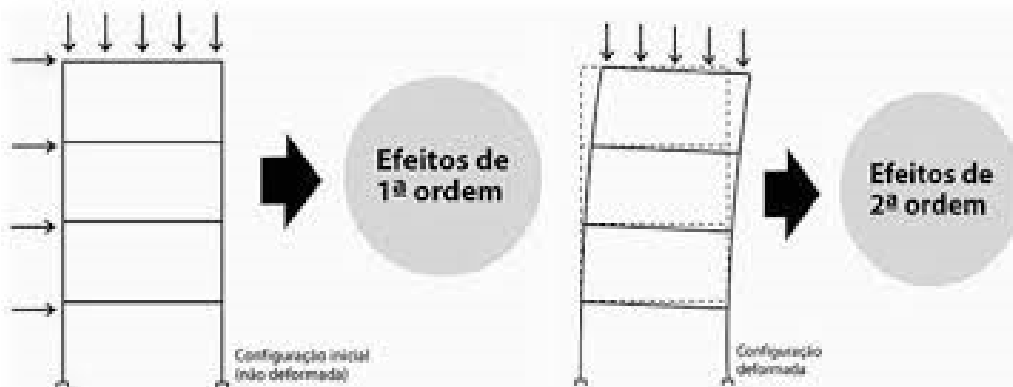


Figura 5 - Configurações: inicial e deformada (Fonte: KIMURA; 2007)

Em síntese, “Os efeitos globais de 2ª ordem são aqueles decorrentes dos deslocamentos horizontais dos nós da estrutura quando aplicadas forças verticais e horizontais sobre elas, e referem-se ao edifício como um todo.” (BOFF, 2021).

2.4 Fator de amplificação de esforços horizontais de vento (FAVt)

Segundo Mancayo (2011), o fator de amplificação de esforços horizontais de vento é um coeficiente específico do sistema CAD/TQS. Ele tem a mesma formulação do coeficiente γ_z estabelecido pela NBR 6118, porém considera o deslocamento horizontal das cargas verticais. Em resumo, o que diferencia os coeficientes é a consideração da parcela $\Delta M_{tot,d}$. Esse parâmetro de estabilidade global considera os deslocamentos horizontais induzidos por forças verticais, frequentemente encontradas em estruturas assimétricas, como em um balanço, ilustrado na Figura 6.

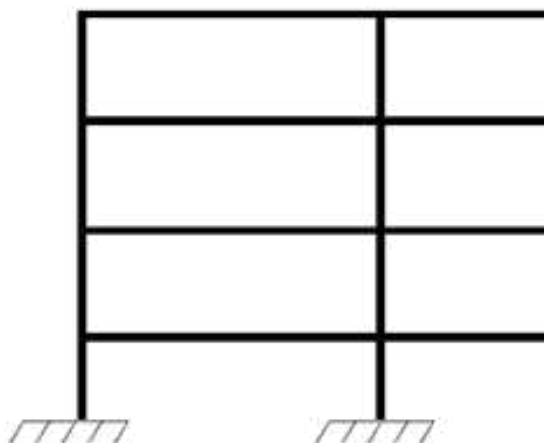


Figura 6 – Estrutura não-simétrica. (Fonte: Moncayo; 2011)

Após a estrutura ser submetida a cargas distribuídas horizontais, pode-se simular um deslocamento ($u_{h,v}$), representado na figura 7.

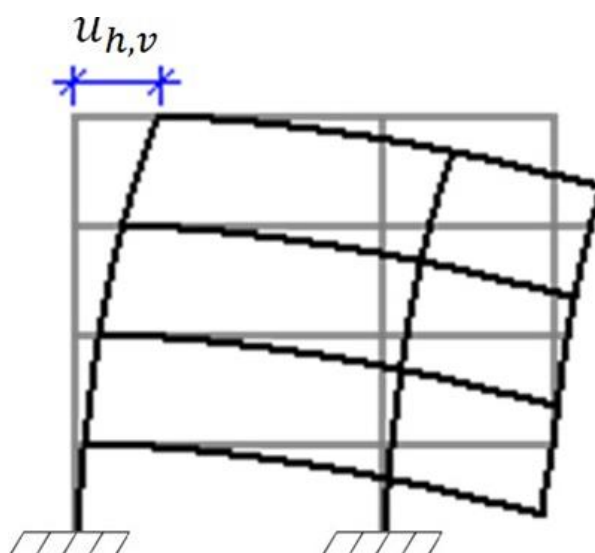


Figura 7 - Deslocamento horizontal devido à carga vertical. (Fonte: Moncayo; 2011)

MONCAYO (2011) ainda cita que o cálculo do FAVt é feito principalmente para aplicação do método aproximado para avaliação dos efeitos de globais de segunda ordem ($0,95 \cdot \gamma_z$) proposto pela NBR 6118:2003, que pode ser chamado de ($0,95 \cdot FAVt$).

2.5 Processo P- Δ

Para Lopes (2005), P-delta é um efeito que ocorre em qualquer estrutura onde os elementos estão submetidos a forças axiais, ou seja, forças na direção longitudinal da peça. Segundo Moncayo (2011), o sistema TQS não se trata do tradicional P-Delta, mas sim de um processo numérico mais rigoroso, também iterativo, em que se fazem sucessivas correções na matriz de rigidez. O processo P-Delta que está inserido no Sistema CAD/TQS surgiu de um trabalho de Medeiros e França (1989), o qual analisa a não-linearidade geométrica em pórticos planos.

Essencialmente, o método segue uma abordagem iterativa, inicialmente conduzindo uma análise de primeira ordem para determinar os deslocamentos resultantes das cargas horizontais que atuam na estrutura. Estes deslocamentos são posteriormente utilizados em conjunto com as cargas verticais para calcular incrementos de cargas horizontais equivalentes. Estes incrementos são combinados com as cargas iniciais em cada nível da estrutura, resultando em novos deslocamentos. Esse processo é repetido em múltiplas iterações, conforme ilustrado na Figura 8, até que a estrutura alcance um estado de equilíbrio.

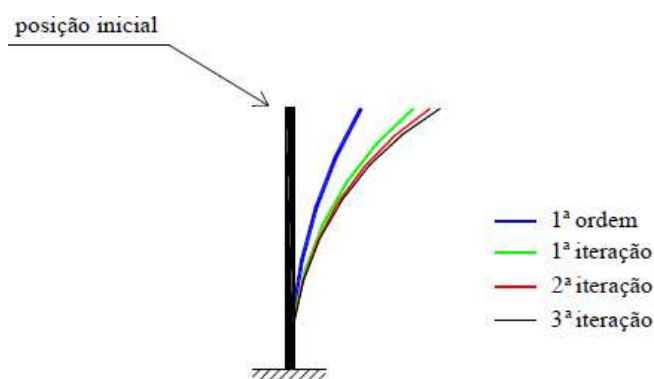


Figura 8 - Iterações do processo P-Delta (Fonte: LIMA;2001)

2.6 Interação solo-estrutura

Para Colares (2006), o processo de interação solo-estrutura é a influência recíproca gerada entre a superestrutura e o sistema de fundação (fundação e solo). Conforme apontado por Jordão (2003), a visão da superestrutura, dos elementos estruturais de fundação e do maciço de solos como sistemas independentes, não corresponde à realidade do comportamento do conjunto. Surge, assim, a necessidade de considerar a interação entre esses sistemas, na determinação da grandeza dos recalques e sua influência na redistribuição dos esforços solicitados nos elementos estruturais e, na estabilidade global da superestrutura.

“No passado, era inviável a consideração da interação solo-estrutura no processo de dimensionamento, devido à grande quantidade e complexidade dos cálculos requeridos para tal avaliação.” (SOUSA; REIS, 2008). Essa interpretação é atualmente reconhecida por sua simplificação excessiva, levando a resultados finais que destoam da realidade. “A desconsideração injustificada da deformabilidade do solo na análise estrutural pode trazer consequências negativas, tanto do ponto de vista de segurança, de economia e de prevenção de manifestações patológicas nas edificações.” (ANTONIAZZI, 2011).

“A hipótese de vínculos indeslocáveis pode conduzir a caminhos totalmente distantes da realidade física.” (DE SOUZA, et al., 2008). A declaração anterior torna-se evidente quando se considera que duas estruturas idênticas, sujeitas às mesmas influências externas, geram esforços solicitantes iguais, independentemente do tipo de solo em que estão adaptados.

Conforme apontado por Iwamoto (2000), a consideração da interação solo-estrutura permite ao calculista estimar os efeitos desta redistribuição de esforços nos elementos estruturais, assim como a forma e a intensidade dos recalques diferenciais, contribuindo para a obtenção de projetos mais eficientes e confiáveis. “Devido a essa redistribuição de esforços, podem ocorrer fissurações em vigas e lajes, bem como esmagamento de pilares. Logo, o desempenho estrutural de uma edificação está vinculado à interação entre seus elementos e o solo.” (HOLANDA JR, 1998)

2.6.1 HIPÓTESE DE WINKLER

No ano de 1867, Winkler propôs um modelo que postulava que as cargas exercidas sobre o solo induzem deslocamentos exclusivamente no ponto de aplicação, sem considerar a continuidade do meio circundante. Em decorrência dessa abordagem, surgiu a sugestão de substituir o maciço de solo por um arranjo composto por molas, cada uma possuindo uma rigidez equivalente. Este modelo pode ser representado com base no arranjo da figura 9.

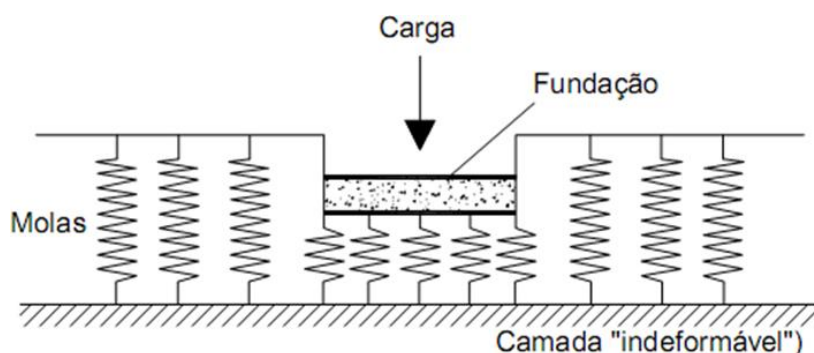


Figura 9 - Hipótese de Winkler: deformabilidade do solo através de molas discretas. (Fonte: Antoniazzi; 2011)

2.6.1.1 Coeficientes de mola para fundações diretas

Para Azeredo (1977), fundações diretas são aquelas que transferem as cargas para o solo resistente através da sua base apoio, desprezando-se qualquer outra forma de transferência das cargas. Além disso o centro de gravidade da fundação deve coincidir com o centro de gravidade do elemento transmissor de carga.

Para a simulação do vínculo elástico entre o solo e a fundações, se faz necessária a adoção de coeficientes, que podem ser obtidos através de tabelas, ábacos e fórmulas empíricas fundamentadas por outros autores. Os coeficientes necessários para inserção no modelo de cálculo são:

- K_v – Coeficiente de recalque vertical;
- K_z – Coeficiente de mola ou de rigidez à translação, na direção “z”;
- K_{rx} – Coeficiente de mola ou de rigidez à rotação (em torno de “x”);
- K_{ry} – Coeficiente de mola ou de rigidez à rotação (em torno de “y”).

2.6.1.1.1 Coeficiente K_v

“Para o emprego de molas sob a base da estrutura deve-se conhecer o coeficiente de mola ou módulo de reação vertical, o qual irá representar a deformabilidade do solo” (ANTONIAZZI, 2011). O coeficiente de recalque vertical (K_v) pode ser obtido por meio de ensaio de placa, correlações com o módulo de elasticidade, que por sua vez, pode ser determinado por ensaios triaxiais, penetração estática (CPT) e de penetração dinâmica

(SPT) ou, de forma mais simples por meio de tabelas com valores típicos padronizados quanto ao tipo de solo conforme a tabela 1, ou pela correlação empírica com a tensão admissível do solo como na tabela 2.

Tabela - Valores de K_v para diferentes tipos de solo.

TIPO DE SOLO	VALOR DE K_v (kgf/cm ³)
Turva leve-solo pantanoso	1,0
Turva pesada-solo pantanoso	1,5
Areia fina de praia	1,5
Aterro de silte, areia e cascalho	2,0
Argila molhada	3,0
Argila húmida	5,0
argila seca	8,0
Argila seca endurecida	10,0
Silte compactado com areia e pedra	10,0
Silte compactado com areia e muita pedra	12,0
Cascalho miúdo com areia fina	12,0
Cascalho médio com areia fina	12,0
Cascalho grosso com areia grossa	15,0
Cascalho grosso com pouca areia	20,0
Cascalho grosso com pouca areia compactada	25,0

Fonte: Kalender, 1962 (adaptado)

Tabela 1 - Correlação empírica entre k_v e pressão admissível do solo

σ_s (kgf/cm ²)	K_v (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	K_v (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	K_v (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	K_v (kgf/cm ³)
0,45	1,17	1,6	3,28	2,75	5,5	3,9	7,8
0,5	1,3	1,65	3,37	2,8	5,6	3,95	7,9
0,55	1,39	1,7	3,46	2,85	5,7	4	8
0,6	1,48	1,75	3,55	2,9	5,8	4,05	8,1
0,65	1,57	1,8	3,64	2,95	5,9	4,1	8,2
0,7	1,66	1,85	3,73	3	6	4,15	8,3
0,75	1,75	1,9	3,82	3,05	6,1	4,2	8,4
0,8	1,84	1,95	3,91	3,1	6,2	4,25	8,5
0,85	1,93	2	4	3,15	6,3	4,3	8,6
0,9	2,02	2,05	4,1	3,2	6,4	4,35	8,7
0,95	2,11	2,1	4,2	3,25	6,5	4,4	8,8
1	2,2	2,15	4,3	3,3	6,6	4,45	8,9
1,05	2,29	2,2	4,4	3,35	6,7	4,5	9
1,1	2,38	2,25	4,5	3,4	6,8	4,55	9,1
1,15	2,47	2,3	4,6	3,45	6,9	4,6	9,2
1,2	2,56	2,35	4,7	3,5	7	4,65	9,3
1,25	2,65	2,4	4,8	3,55	7,1	4,7	9,4
1,3	2,74	2,45	4,9	3,6	7,2	4,75	9,5
1,35	2,83	2,5	5	3,65	7,3	4,8	9,6
1,4	2,92	2,55	5,1	3,7	7,4	4,85	9,7
1,45	3,01	2,6	5,2	3,75	7,5	4,9	9,8
1,5	3,1	2,65	5,3	3,8	7,6	4,95	9,9
1,55	3,19	2,7	5,4	3,85	7,7	5	10

Fonte: Morrison, 1993 (adaptado)

2.6.1.1.2 Coeficientes K_z , K_{rx} e K_{ry}

Os coeficientes K_z , K_{rx} e K_{ry} são obtidos com base no coeficiente de recalque vertical (K_v) e nas dimensões geométricas das sapatas, conforme as equações 1, 2 e 3.

$$K_z = K_v \cdot A_b \quad (1)$$

$$A_b = A \cdot B \quad (1.1)$$

$$K_{rx} = K_v \cdot I_x \quad (2)$$

$$I_x = \frac{A \cdot B^3}{12} \quad (2.1)$$

$$K_{ry} = K_v \cdot I_y \quad (3)$$

$$I_y = \frac{B \cdot A^3}{12} \quad (3.1)$$

Sendo:

- A_b = Área da base da sapata;
- A = Maior dimensão da sapata;
- B = Menor dimensão da sapata;
- I_x = Momento de inércia em x;
- I_y = Momento de inércia em y.

A figura 10 ilustra o contexto da estrutura no estão inseridos os eixos x, y e z. Os eixos x e y são orientados de forma paralela ao plano horizontal, enquanto o eixo z é perpendicular.

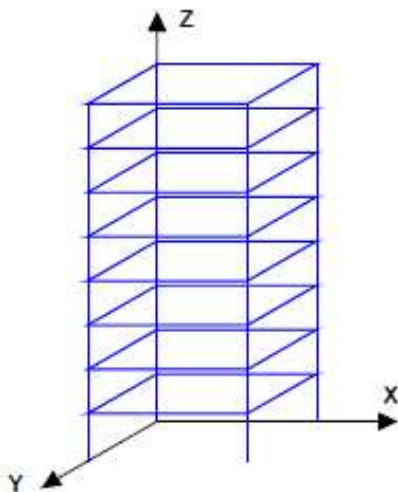


Figura 10 - Eixos de rotação em um edifício. (Fonte: AltoQI, 2023)

O eixo x será sempre considerado paralelo a maior dimensão da sapata, enquanto o eixo y paralelo a menor dimensão, conforme a figura 11.

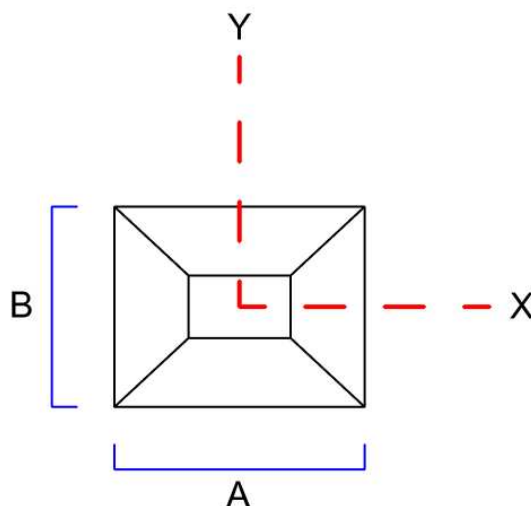


Figura 11 - Direção dos eixos a se considerar numa sapata. (Fonte: O Autor; 2023)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A partir de uma concepção arquitetônica, foi realizado o dimensionamento de uma estrutura em concreto armado, que será objeto de análise em relação à sua estabilidade global, considerando diferentes cenários de vinculação da fundação-solo. Os casos de vinculação a serem considerados incluem:

- Caso "A": Vínculo Rotulado.
- Caso "B": Vínculo Engastado.
- Caso "C-1": Modelo de Molas para $\sigma_s = 3,0 \text{ Kg/cm}^3$.
- Caso "C-2": Modelo de Molas para $\sigma_s = 3,5 \text{ Kg/cm}^3$.
- Caso "C-3": Modelo de Molas para $\sigma_s = 4,0 \text{ Kg/cm}^3$.
- Caso "C-4": Modelo de Molas para $\sigma_s = 4,5 \text{ Kg/cm}^3$.
- Caso "C-5": Modelo de Molas para $\sigma_s = 5,0 \text{ Kg/cm}^3$.

Inicialmente, serão projetadas sapatas, levando em conta uma vinculação engastada com o solo, para cada resistência. Posteriormente, os coeficientes de deformação do solo, de acordo com a hipótese de Winkler, serão determinados e incorporados ao modelo. Por fim, uma análise de estabilidade global será realizada para os casos, e os resultados serão apresentados e discutidos como conclusão deste estudo.

3.1 Arquitetura

O projeto arquitetônico da edificação foi desenvolvido com o auxílio do software Revit, da Autodesk. O projeto foi pensado para uma edificação multifamiliar, compreendendo os seguintes pavimentos: térreo, 15 pavimentos "tipo", uma cobertura e um reservatório, conforme ilustrado na Figura 12.



Figura 12 - Vista 3D Arquitetônica. (Fonte: O Autor; 2023)

Para cada pavimento "tipo", foram alocados: uma escada em formato de "U", dois elevadores e quatro apartamentos. Cada uma dessas unidades residenciais foi concebida com uma configuração funcional, compreendendo duas suítes, uma sacada, uma cozinha, uma sala de estar e uma área de serviço, conforme demonstrado na Figura 13.

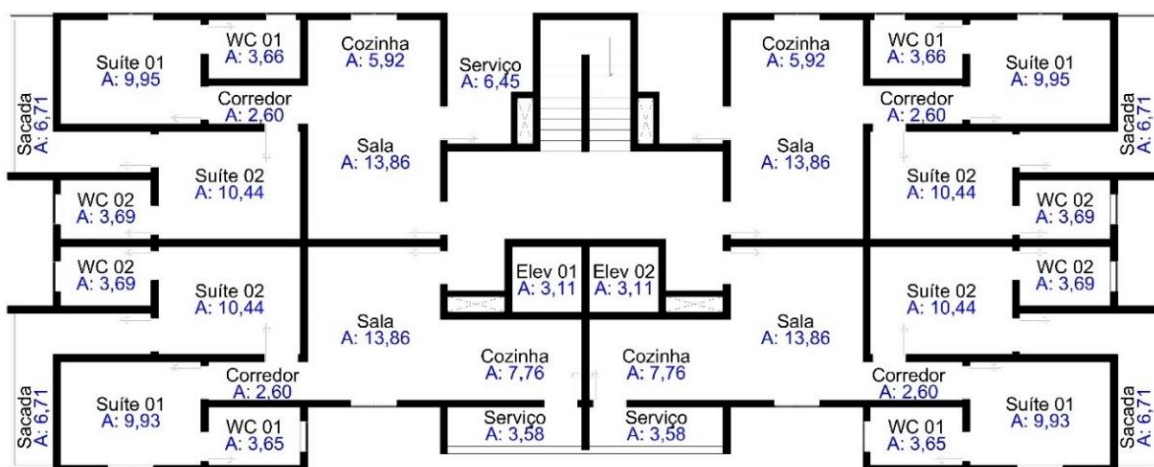


Figura 13 - Planta baixa dos pavimentos "tipo". (Fonte: O Autor; 2023)

3.2 Estrutura

O projeto estrutural da edificação bem como todo o processamento de estabilidade global, foram desenvolvidos com a utilização do software TQS, da TQS Informática. Seu uso foi aplicado, em primeiro plano, na concepção e dimensionamento dos elementos estruturais, levando em consideração as normas brasileiras que regem os projetos dessa natureza:

- NBR 6118:2023 - Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento;
- NBR 6123:1988 - Força Devidas ao Vento em Edificações;
- NBR 6120:2019 - Ações para o cálculo de estruturas em edificações.

Todo o projeto foi desenvolvido em concreto armado de resistência 30 MPa, acima da resistência mínima de 25 MPa para a classe de agressividade II adotada. Um concreto mais resistente se fez importante para a presente edificação pelos altos esforços solicitantes verticais e por ter maior durabilidade, sendo usualmente utilizado em edificações deste porte. No projeto também foram empregadas lajes maciças e fundação do tipo sapata isolada. A seguir, as figuras 14 e 15 demonstram o resultado final do projeto.

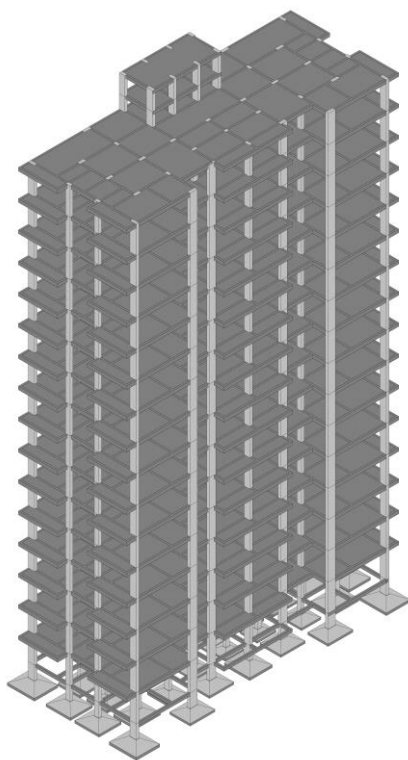


Figura 14 - Vista 3D Estrutural. (Fonte: O Autor; 2023)

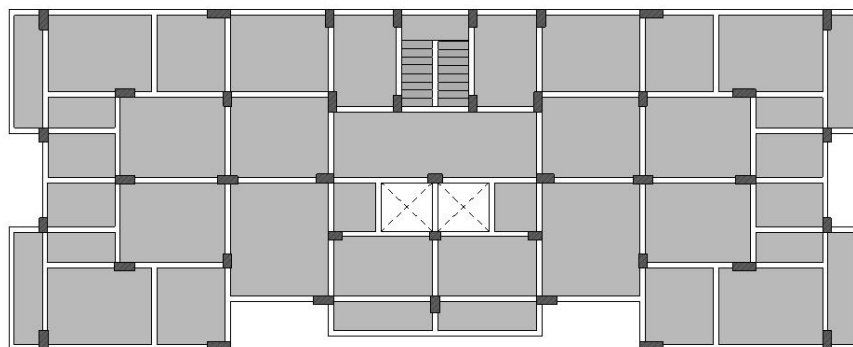


Figura 15 - Planta de forma dos pavimentos "tipo". (Fonte: O Autor; 2023)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados e analisados os dados obtidos para cada caso específico, abordando o dimensionamento de sapatas, estimando os coeficientes de mola de acordo com métodos empíricos e examinando os valores dos parâmetros de estabilidade FAVt e $P\Delta$ correspondentes. Os resultados dos coeficientes de estabilidade serão expressos para 4 direções (0° , 90° , 180° e 270°), conforme a figura 16.

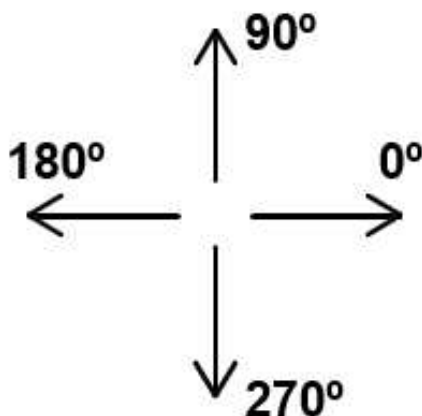


Figura 16 – Sentidos da ação do vento. (Fonte: Moncayo; 2011)

4.1 Caso “A” (Vínculo Rotulado)

Quadro 1 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso “A”)

Ângulo	γz	FAVt	$P\Delta$
0°	1.18	1.175	1.178
90°	1.18	1.181	1.183
180°	1.18	1.179	1.187
270°	1.18	1.184	1.191

Fonte: O Autor; 2023.

4.2 Caso “B” (Vínculo Engastado)

Quadro 2 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso “B”)

Ângulo	γz	FAVt	$P\Delta$
0°	1.13	1.13	1.129
90°	1.14	1.141	1.141
180°	1.13	1.132	1.135
270°	1.14	1.144	1.147

Fonte: O Autor; 2023.

4.3 Caso “C-1” (Modelo de Molas para $\sigma_s = 3,0$)

Tabela 2 – Dados de entrada (Caso “C-1”)

Sapata	A (cm)	B (cm)	K_v (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	K_v (kgf/cm ³)
S1 = S8 = S38 = S39	300	260	6	3	S22	220	195	6
S2	305	255	6	3	S23	245	210	6
S3 = S6	255	220	6	3	S24	265	220	6

Interação solo-estrutura aplicada na análise de estabilidade global de um edifício

Carlos Dimitri Bernardo Nascimento

S4	250	220	6	3	S25	270	230	6
S5	250	215	6	3	S26	270	245	6
S7	305	255	6	3	S27	260	240	6
S9	285	240	6	3	S28	215	190	6
S10	250	225	6	3	S29	200	185	6
S11	295	245	6	3	S30	210	185	6
S12 = S15	260	215	6	3	S31	240	215	6
S13	260	230	6	3	S32	280	240	6
S14	260	225	6	3	S33	235	215	6
S16	245	220	6	3	S34	290	240	6
S17	270	245	6	3	S35	270	230	6
S18	265	245	6	3	S36	280	250	6
S19	275	230	6	3	S37	230	270	6
S20	260	220	6	3	S40 = S41	275	225	6
S21	245	210	6	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor; 2023.

Tabela 3 – Coeficientes de mola (Caso “C-1”)

Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)	Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)
S1 = S8 = S38 = S39	46800	35100	26364	S22	25740	10382	8156
S2	46665	36175	25287	S23	30870	11345	15441
S3 = S6	33660	18240	13576	S24	34980	14109	20471
S4	33000	17188	13310	S25	37260	16425	22635
S5	32250	16797	12423	S26	39690	19853	24112
S7	46665	36175	25287	S27	37440	17971	21091
S9	41040	27779	19699	S28	24510	7373	9441
S10	33750	17578	14238	S29	22200	6332	7400
S11	43365	31449	21692	S30	23310	6648	8566
S12 = S15	33540	18894	12920	S31	30960	11926	14861
S13	35880	20212	15817	S32	40320	19354	26342
S14	35100	19773	14808	S33	30315	11678	13951
S16	32340	16177	13044	S34	41760	20045	29267
S17	39690	24112	19853	S35	37260	16425	22635
S18	38955	22797	19486	S36	42000	21875	27440
S19	37950	23916	16730	S37	37260	22635	16425
S20	34320	19334	13842	S40 = S41	37125	15662	23396
S21	30870	15441	11345	-	-	-	-

Fonte: O Autor; 2023.

Quadro 3 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso “C-1”)

Ângulo	γz	FAVt	PΔ
0°	1.14	1.14	1.140
90°	1.16	1.161	1.158
180°	1.14	1.143	1.146
270°	1.16	1.165	1.168

Fonte: O Autor; 2023.

4.4 Caso “C-2” (Modelo de Molas para $\sigma_s = 3,5$)

Tabela 4 - Dados de entrada (Caso “C-2”)

σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	Kv (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	Kv (kgf/cm ³)
3,5	S1 = S8 = S38 = S39	280	240	7	3,5	S21	225	190	7
3,5	S2	285	230	7	3,5	S22	200	180	7
3,5	S3 = S6	235	200	7	3,5	S23	225	190	7
3,5	S4	230	195	7	3,5	S24	245	200	7
3,5	S5	225	195	7	3,5	S25	250	205	7
3,5	S7	285	230	7	3,5	S26	250	225	7
3,5	S9	260	220	7	3,5	S27	245	220	7
3,5	S10	230	205	7	3,5	S28	200	175	7
3,5	S11	275	220	7	3,5	S29	185	170	7
3,5	S12 = S15	235	190	7	3,5	S30	195	170	7
3,5	S13	235	205	7	3,5	S31	220	195	7
3,5	S14	235	200	7	3,5	S32	260	220	7
3,5	S16	225	200	7	3,5	S33	220	195	7
3,5	S17	250	225	7	3,5	S34	270	220	7
3,5	S18	245	225	7	3,5	S35 = 37	250	210	7
3,5	S19	255	210	7	3,5	S36	260	230	7
3,5	S20	245	200	7	3,5	S40 = S41	255	205	7

Fonte: O Autor; 2023.

Tabela 5 - Coeficientes de mola (Caso “C-2”)

Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)	Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)
S1 = S8 = S38 = S39	47040	30733	22579	S21	29925	12625	9002
S2	45885	31058	20228	S22	25200	8400	6804
S3 = S6	32900	15141	10967	S23	29925	9002	12625
S4	31395	13840	9948	S24	34300	11433	17157
S5	30712,5	12957	9732	S25	35875	12564	18685
S7	45885	31058	20228	S26	39375	16611	20508
S9	40040	22556	16149	S27	37730	15218	18873
S10	33005	14550	11559	S28	24500	6253	8167
S11	42350	26689	17081	S29	22015	5302	6279
S12 = S15	31255	14384	9403	S30	23205	5589	7353
S13	33722,5	15519	11810	S31	30030	9516	12112
S14	32900	15141	10967	S32	40040	16149	22556
S16	31500	13289	10500	S33	30030	9516	12112
S17	39375	20508	16611	S34	41580	16771	25260
S18	38587,5	19302	16279	S35 = 37	36750	13506	19141
S19	37485	20312	13776	S36	41860	18453	23581
S20	34300	17157	11433	S40 = S41	36592,5	12815	19829

Fonte: O Autor; 2023.

Quadro 4 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso "C-2")

Ângulo	γz	FAVt	PA
0°	1.14	1.141	1.41
90°	1.16	1.162	1.16
180°	1.14	1.144	1.147
270°	1.16	1.166	1.169

Fonte: O Autor; 2023.

4.5 Caso "C-3" (Modelo de Molas para $\sigma_s = 4,0$)

Tabela 6 - Dados de entrada (Caso "C-3")

σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	Kv (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	Kv (kgf/cm ³)
4	S1 = S8 = S38 = S39	265	220	8	4	S22	190	170	8
4	S2	270	215	8	4	S23	215	180	8
4	S3 = S6	220	190	8	4	S24	235	190	8
4	S4	220	185	8	4	S25	240	195	8
4	S5	215	185	8	4	S26	235	210	8
4	S7	270	215	8	4	S27	230	205	8
4	S9	245	205	8	4	S28	185	160	8
4	S10	220	195	8	4	S29	175	160	8
4	S11	260	205	8	4	S30	190	165	8
4	S12	225	180	8	4	S31 = S33	210	185	8
4	S13 = S14	225	195	8	4	S32	245	205	8
4	S15 = 20	230	185	8	4	S34	255	205	8
4	S16	215	190	8	4	S35 = S37	235	195	8
4	S17 = S18	235	210	8	4	S36	245	215	8
4	S19	240	195	8	4	S40 = S41	240	190	8
4	S21	215	180	8	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor; 2023.

Tabela 7 - Coeficientes de mola (Caso "C-3")

Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)	Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)
S1 = S8 = S38 = S39	46640	27294	18811	S22	25840	7774	6223
S2	46440	28212	17889	S23	30960	8359	11926
S3 = S6	33440	13487	10060	S24	35720	10746	16439
S4	32560	13133	9286	S25	37440	11864	17971
S5	31820	12257	9075	S26	39480	14509	18169
S7	46440	28212	17889	S27	37720	13210	16628
S9	40180	20098	14071	S28	23680	5052	6754
S10	34320	13842	10875	S29	22400	4779	5717
S11	42640	24021	14933	S30	25080	5690	7545
S12	32400	13669	8748	S31 = S33	31080	8864	11422
S13 = S14	35100	14808	11122	S32	40180	14071	20098

S15 = 20	34040	15006	9708	S34	41820	14646	22661
S16	32680	12589	9831	S35 =			
S17 = S18	39480	18169	14509	S37	36660	11617	16871
S19	37440	17971	11864	S36	42140	16233	21079
S21	30960	11926	8359	S40 =			
				S41	36480	10974	17510
				-	-	-	-

Fonte: O Autor; 2023.

Quadro 5 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso “C-3”)

Ângulo	γ_z	FAVt	$P\Delta$
0°	1.14	1.142	1.141
90°	1.16	1.162	1.16
180°	1.14	1.146	1.149
270°	1.16	1.167	1.17

Fonte: O Autor; 2023.

4.6 Caso “C-4” (Modelo de Molas para $\sigma_s = 4,5$)

Tabela 8 - Dados de entrada (Caso “C-4”)

σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	Kv (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	Kv (kgf/cm ³)
4,5	S1	250	210	9	4,5	S22	180	160	9
4,5	S2	255	200	9	4,5	S23	200	165	9
4,5	S3 = S6	210	175	9	4,5	S24	220	175	9
4,5	S4 = S5	205	175	9	4,5	S25	230	185	9
4,5	S7	255	200	9	4,5	S26	225	200	9
4,5	S8 = S38 = S39	250	205	9	4,5	S27	220	195	9
4,5	S9	235	190	9	4,5	S28 = S30	180	155	9
4,5	S10	205	180	9	4,5	S29	165	150	9
4,5	S11	245	195	9	4,5	S31 = S33	200	175	9
4,5	S12 = S15	215	170	9	4,5	S32	235	190	9
4,5	S13	215	185	9	4,5	S34	240	190	9
4,5	S14	215	180	9	4,5	S35	225	185	9
4,5	S16	205	180	9	4,5	S36	230	200	9
4,5	S17	225	200	9	4,5	S37	225	180	9
4,5	S18	220	195	9	4,5	S40	230	175	9
4,5	S19 = S20	225	180	9	4,5	S41	230	180	9
4,5	S21	205	170	9	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor; 2023.

Tabela 9 - Coeficientes de mola (Caso “C-4”)

Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)	Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)
S1	47250	24609	17364	S22	25920	6998	5530
S2	45900	24872	15300	S23	29700	6738	9900
S3 = S6	33075	12155	8441	S24	34650	8843	13976
S4 = S5	32288	11307	8240	S25	38295	10922	16882

Interação solo-estrutura aplicada na análise de estabilidade global de um edifício

Carlos Dimitri Bernardo Nascimento

S7	45900	24872	15300	S26	40500	13500	17086
S8 = S38 =				S27	38610	12235	15573
S39	46125	24023	16153	S28 = S30	25110	5027	6780
S9	40185	18493	12089	S29	22275	4177	5054
S10	33210	11630	8967	S31 = S33	31500	8039	10500
S11	42998	21508	13625	S32	40185	12089	18493
S12 = S15	32895	12671	7922	S34	41040	12346	19699
S13	35798	13789	10210	S35	37463	10685	15804
S14	34830	13417	9404	S36	41400	13800	18251
S16	33210	11630	8967	S37	36450	9842	15377
S17	40500	17086	13500	S40	36225	9245	15969
S18	38610	15573	12235	S41	37260	10060	16425
S19 = S20	36450	15377	9842	-	-	-	-
S21	31365	10984	7554				

Fonte: O Autor; 2023.

Quadro 6 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso “C-4”)

Ângulo	γz	FAVt	$P\Delta$
0°	1.14	1.143	1.142
90°	1.16	1.163	1.16
180°	1.14	1.146	1.149
270°	1.16	1.167	1.17

Fonte: O Autor; 2023.

4.7 Caso “C-5” (Modelo de Molas para $\sigma_s = 5,0$)

Tabela 10 - Dados de entrada (Caso “C-5”)

σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	K_v (kgf/cm ³)	σ_s (kgf/cm ²)	Sapata	A (cm)	B (cm)	K_v (kgf/cm ³)
5	S1 = S38	240	195	10	5	S20	205	165	10
5	S2	245	190	10	5	S21 = S23	195	160	10
5	S3 = S6	200	165	10	5	S22	170	150	10
5	S4 = S5	195	165	10	5	S25	220	175	10
5	S7	240	190	10	5	S26	210	185	10
5	S8	240	195	10	5	S27	205	180	10
5	S9	225	180	10	5	S28 = S30	170	145	10
5	S10	195	170	10	5	S29	160	145	10
5	S11	235	180	10	5	S31 = S33	190	165	10
5	S12 = S24	210	165	10	5	S32	225	180	10
5	S13 = S14	205	170	10	5	S34	230	180	10
5	S15	210	165	10	5	S35 = S37	215	170	10
5	S16	195	170	10	5	S36	220	190	10
5	S17 = S18	210	185	10	5	S39	235	195	10
5	S19	215	170	10	5	S40 = S41	220	165	10

Fonte: O Autor; 2023.

Tabela 11 - Coeficientes de mola (Caso "C-5")

Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)	Sapata	Kz (tf/m)	Krx (tf*m/rad)	Kry (tf*m/rad)
S1 = S38	46800	22464	14830	S20	33825	11846	7674
S2	46550	23285	14004	S21 = S23	31200	9887	6656
S3 = S6	33000	11000	7487	S22	25500	6141	4781
S4 = S5	32175	10195	7300	S25	38500	9826	15528
S7	45600	21888	13718	S26	38850	11080	14277
S8	46800	22464	14830	S27	36900	9963	12923
S9	40500	17086	10935	S28 = S30	24650	4319	5937
S10	33150	10504	7984	S29	23200	4065	4949
S11	42300	19467	11421	S31 = S33	31350	7113	9431
S12 = S24	34650	12734	7861	S32	40500	10935	17086
S13 = S14	34850	12205	8393	S34	41400	11178	18251
S15	34650	12734	7861	S35 = S37	36550	8802	14079
S16	33150	10504	7984	S36	41800	12575	16859
S17 = S18	38850	14277	11080	S39	45825	14521	21089
S19	36550	14079	8802	S40 = S41	36300	8236	14641

Fonte: O Autor; 2023.

Quadro 7 - Coeficientes de Estabilidade Global (Caso "C-5")

Ângulo	γz	FAVt	PΔ
0°	1.14	1.144	1.142
90°	1.16	1.163	1.161
180°	1.14	1.147	1.15
270°	1.16	1.168	1.171

Fonte: O Autor; 2023.

4.7 Análise de coeficientes de mola

Observa-se que à medida que a resistência do solo é incrementada, as dimensões A e B das sapatas são reduzidas. Como resultado, os coeficientes de mola krx e kry, os quais estão intrinsecamente ligados ao momento de inércia das sapatas (equações 2 e 3), também sofrem uma diminuição correspondente. Simultaneamente, o coeficiente kz, diretamente proporcional a AB e Kv (equação 1), tende a apresentar poucas variações, tanto em acréscimo quanto em redução, dado que, apesar da redução das áreas de apoio das sapatas, há um aumento de kv.

4.8 Análise gráfica de estabilidade global

A seguir, serão apresentados gráficos que ilustram as variações de FAVt e PΔ, com relação às diferentes resistências do solo, inseridas entre os respectivos valores de engastamento e rotulação, para cada ângulo.

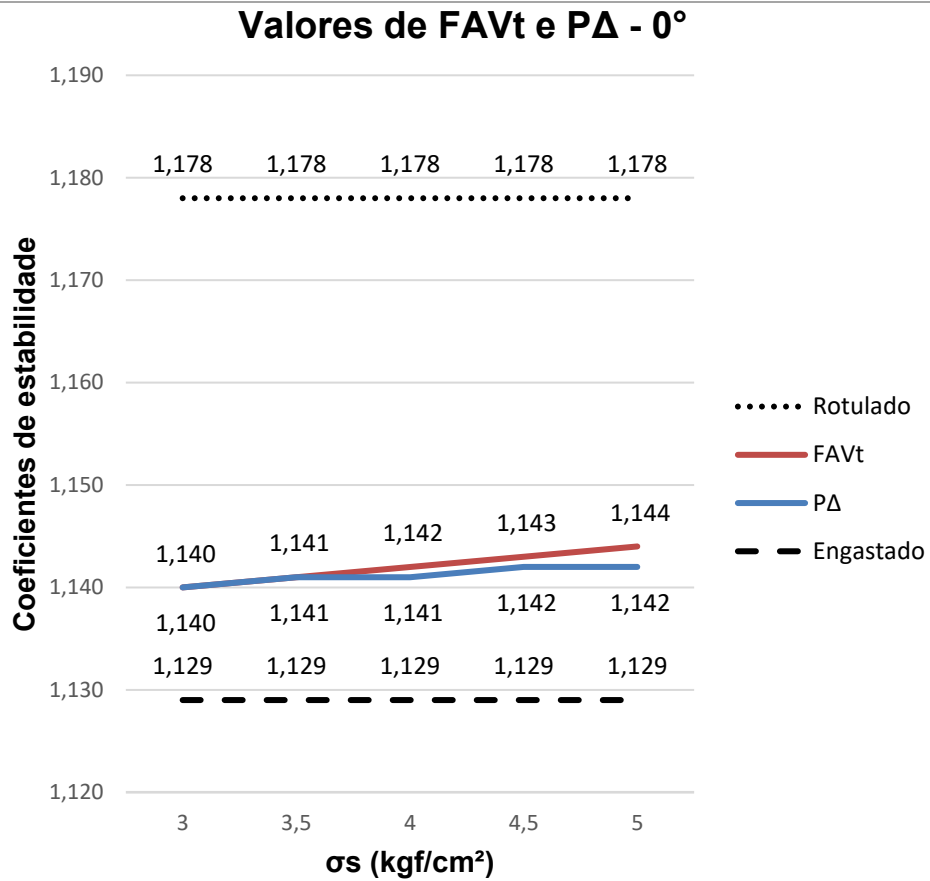


Gráfico 1 – Gráfico coeficiente de estabilidade x resistência do solo para FAVt e PΔ em 0°. (Fonte: O Autor, 2023)

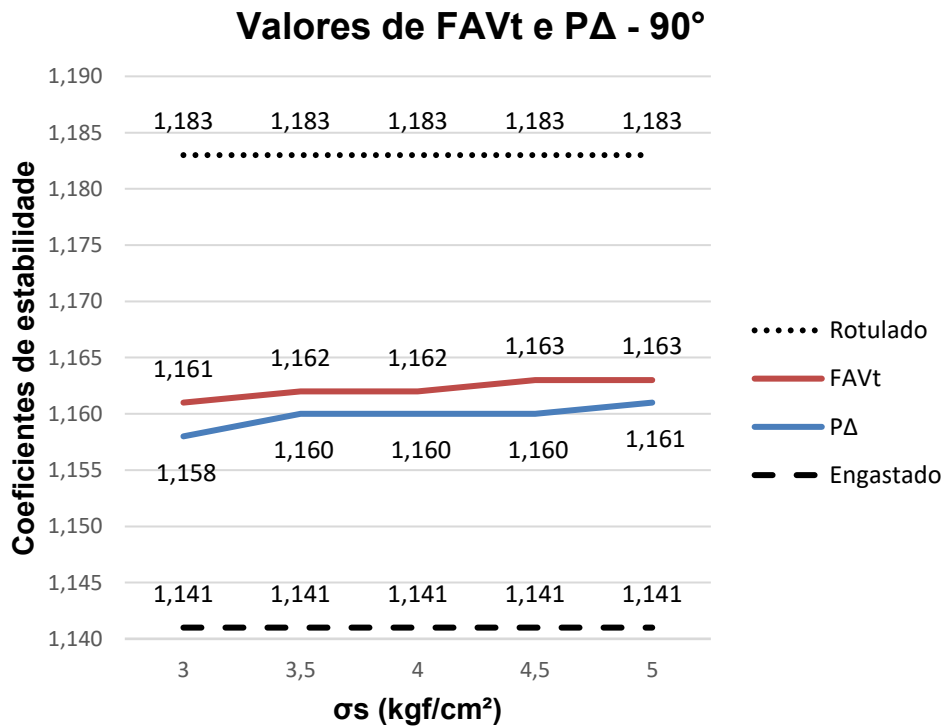


Gráfico 2 - Gráfico coeficiente de estabilidade x resistência do solo para FAVt e PΔ em 90°. (Fonte: O Autor, 2023)

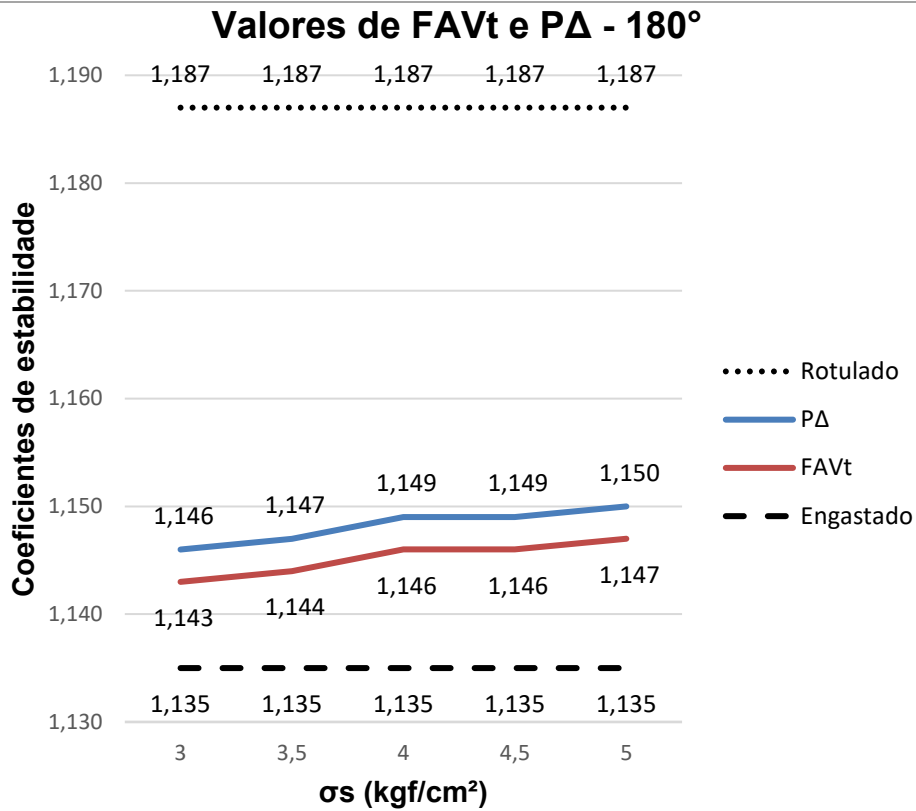


Gráfico 3 - Gráfico coeficiente de estabilidade x resistência do solo para FAVt e PΔ em 180°. (Fonte: O Autor, 2023)

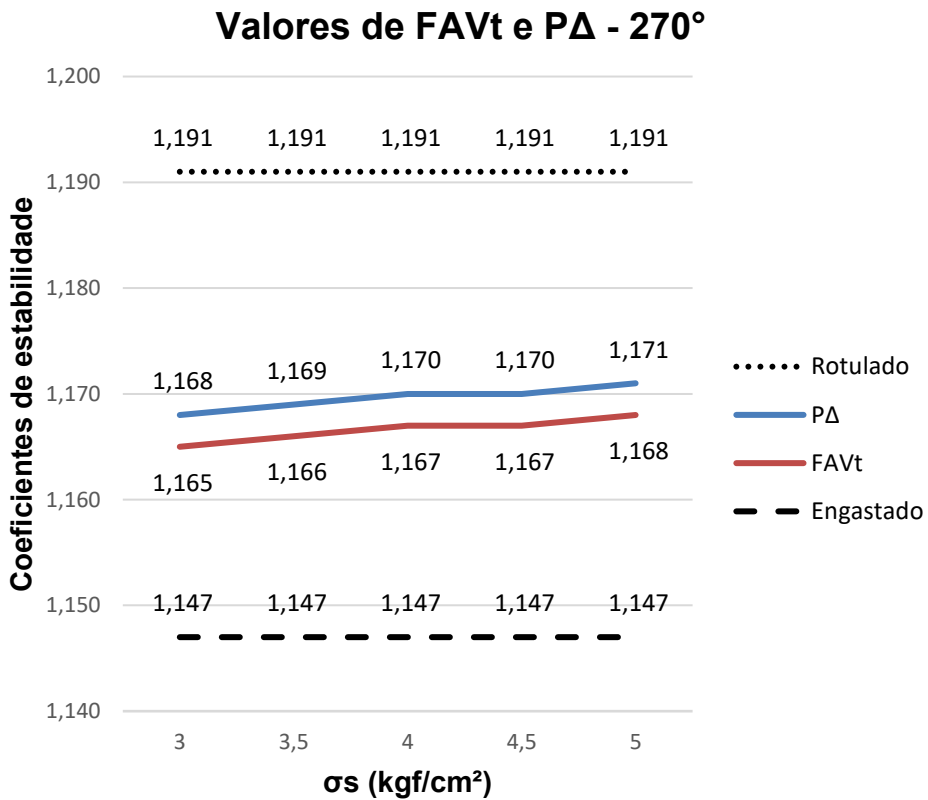


Gráfico 4 - Gráfico coeficiente de estabilidade x resistência do solo para FAVt e PΔ em 270°. (Fonte: O Autor, 2023)

Ao analisar os gráficos 1, 2, 3 e 4, fica evidente que, em todos os ângulos considerados, se observa um aumento progressivo nos coeficientes de estabilidade, que, contribui para uma crescente instabilidade estrutural. Esse aspecto é influenciado pela redução das áreas de base das sapatas, que ao diminuírem, passam a possuir menos rigidez à rotação, resultando em um desafio adicional na garantia da estabilidade do sistema.

COMPARATIVO ENTRE VINCULAÇÕES EM TODAS DIREÇÕES PARA P-Δ

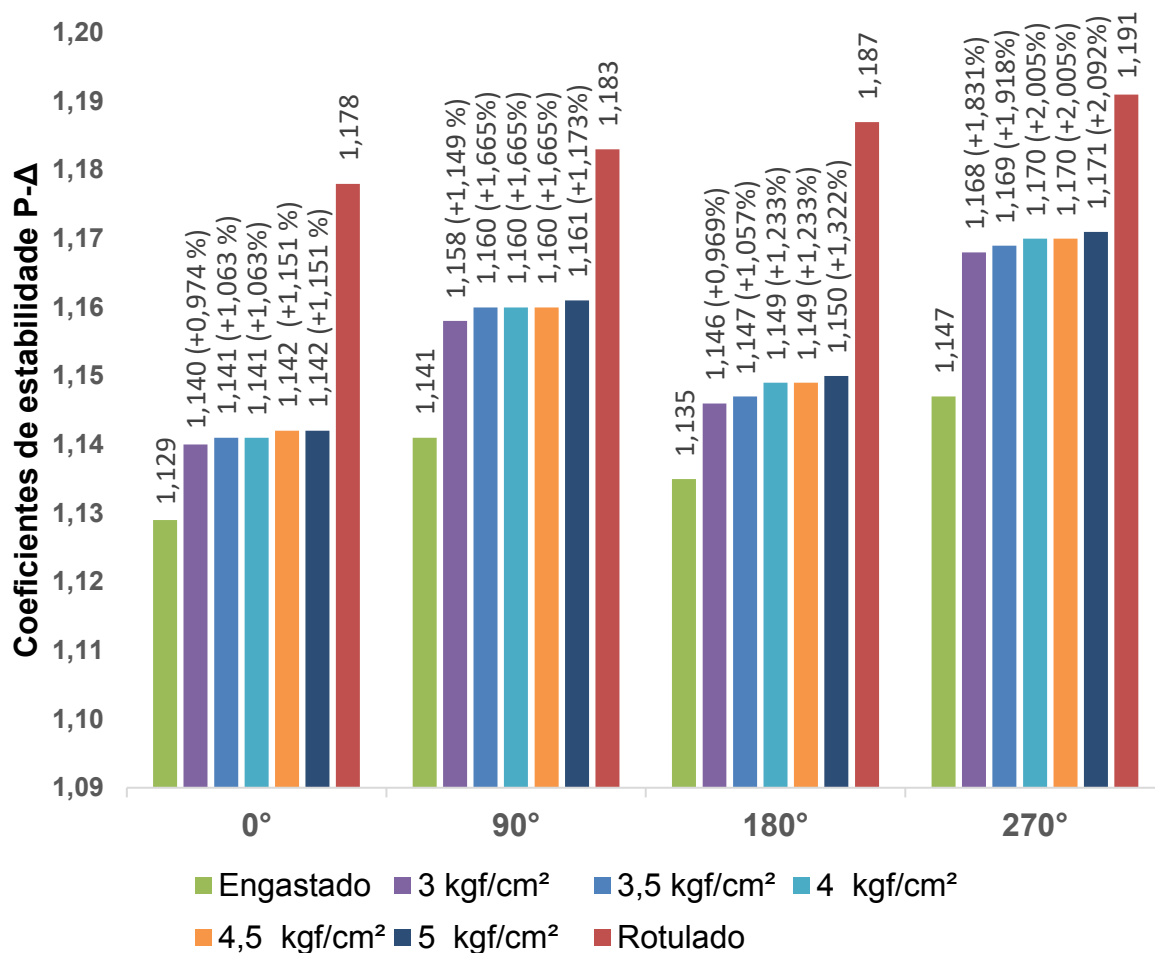


Gráfico 5 – Gráfico comparativo de estabilidade para todas vinculações utilizadas para o coeficiente P-Δ
(Fonte: O Autor, 2023)

O Gráfico 5 demonstra a diferença numérica observada ao considerar vínculos estruturais indeslocáveis (engastados ou rotulados), em comparação com a utilização de apoios elásticos, que notavelmente representam uma espécie de "meio-termo" entre essas duas abordagens distintas.

5. CONCLUSÕES

A ISE exerceu para essa análise um impacto negativo na estabilidade global do edifício. Pois, os resultados obtidos nas análises práticas de estabilidade global corroboram a teoria preconizada: a incorporação da variável de deformabilidade do solo em projetos estruturais se manifesta como um fator que gera uma redistribuição das cargas ao longo da estrutura. Essa redistribuição de cargas gera esforços diferentes dos previstos anteriormente nos elementos estruturais, podendo ser necessários ajustes nos mesmos.

- Em 0° os valores de coeficientes de estabilidade considerando apoios elásticos foram maiores de 0,974% à 1,151% do valor do vínculo engastado e menores de 3,056% à 3,226% do valor do vínculo rotulado.
- Em 90° os valores de coeficientes de estabilidade considerando apoios elásticos foram maiores de 1,49% à 1,753% do valor do vínculo engastado e menores de 32,19% à 2,443% do valor do vínculo rotulado.
- Em 180° os valores de coeficientes de estabilidade considerando apoios elásticos foram maiores de 0,969% à 1,322% do valor do vínculo engastado e menores de 3,117% à 3,454% do valor do vínculo rotulado.
- Em 270° os valores de coeficientes de estabilidade considerando apoios elásticos foram maiores de 1,831% à 2,092% do valor do vínculo engastado e menores de 1,679% à 1,931% do valor do vínculo rotulado.

Observando os dados, consta-se que a capacidade de suporte do solo subjacente às fundações tem uma relação inversa com o conceito de engastamento da estrutura, e direta com o conceito de rotulação. Porém, a abordagem de vínculos rotulados apontou níveis acentuados de instabilidade global no edifício.

Para o edifício do presente estudo, a consideração da ISE na estabilidade global foi pouco expressiva. Em tese, em edifícios mais esbeltos, e/ou onde o vento atue de forma mais agressiva, esta incorporação tende a ser mais efetiva.

Entretanto, conclui-se que optar pela abordagem de engastamento está contra a segurança, uma vez que os índices de estabilidade global apontados seriam menores que os reais. De forma inversa, optar pela abordagem rotulada implica em índices mais altos de instabilidade global, levando a um dimensionamento estrutural mais robusto, tornando o projeto mais oneroso. Nesse contexto, se comprova a importância de uma tomada de decisão pautada em uma avaliação ponderada entre segurança e custo, tornando relevante a incorporação da ISE em projetos de edifícios de múltiplos pavimentos para a verificação de estabilidade global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Elcio Cassimiro; PAIXÃO, João Fernando Martins. **Análise de estabilidade global em edifícios altos**. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, vol 13, núm. 1, 2017, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.

ALVES DE SOUZA, rafael; CORDEIRO DOS REIS, Jeselay hemetério. **Interação solo-estrutura para edifícios sobre fundações rasas**. Acta Scientiarum. Technology, vol. 30, núm. 2, 2008, Universidade Estadual de Maringá Maringá, Brasil.

ANTONIAZZI, Juliana Pippi. **Interação solo-estrutura de edifícios com fundações superficiais**. Dissertação de Mestrado da universidade federal de santa maria centro de tecnologia, Santa Maria, RS, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações**, Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6123: **Força Devidas ao Vento em Edificações**, Rio de Janeiro, 1988.

A. S. R. BARBOZA; C. W. S. DINIZ; E. N. LAGES. **Estabilidade global de sistemas estruturais de edifícios considerando a ligação viga-pilar parede**. Revista IBRACON se Estruturas e Materiais, Maceió, AL, 2019.

AZEREDO, Hélio Alves De. **O Edifício Até Sua Cobertura**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

BENEVOLO, L. **História da arquitetura moderna**. São Paulo: Editora Perspectiva, 2001.

BOFF, MARIANA PAGNONCELLI. **Estudo dos efeitos da não linearidade geométrica e física sobre o comportamento de uma edificação em concreto armado**. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria UFSM, RS, 2021.

CECCON, jorge luiz; LEOPOLDO, Ricardo; FRANÇA, Silva. **Análise dos efeitos de segunda ordem em pilares solicitados a flexão oblíqua composta**. Tese de doutorado, USP, São Paulo, SP, 2008.

COLARES, G.M. **Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios**. Dissertação de mestrado da EESC da USP. São Carlos, SP, 2006.

CORREIA GOMES, ANTONIO. **Características da deformabilidade do solo que interessam à funcionalidade das estruturas**. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2004.

GONÇALVES, P. **Uma introdução à instabilidade das estruturas**. Puc Rio. Rio de Janeiro: 1993.

HENNRICHS, C. A. (2003). **Estudos sobre a Modelagem de Lajes Planas de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

HOLANDA JR, O.G. **Interação solo-estrutura para edifícios de concreto armado sobre fundações diretas**. Dissertação de mestrado da EESC da USP. São Carlos – SP, 1998.

IWAMOTO, R. K. **Alguns aspectos dos efeitos da interação solo – estrutura em edifícios de múltiplos andares com fundação profunda**. Dissertação de Mestrado da EESC da USP, São Carlos, SP, 2000.

JORDÃO, D. R. (2003). **Estabilidade global de edifícios sobre fundações profundas considerando a interação estrutura-solo**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003

KIMURA, A. **Informática aplicada a estruturas de concreto armado**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.

L. A. FEITOSA; E. C. ALVES. **Estudo da estabilidade global de edifícios altos com lajes protendidas**. Revista IBRACON se Estruturas e Materiais, Vitória, ES, 2015.

LIMA, J. S. **Verificações da punção e da estabilidade global de edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

LOPES, A. P., SANTOS; G. O.; SOUZA, A. L. A. C. **Estudo sobre diferentes métodos de análise p-delta**. Congresso Brasileiro do Concreto, 47., Olinda. Anais... Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo.

MACIEL, VICTOR MARIANO. **Análise da influência da não linearidade física no comportamento não linear estático de treliças espaciais**. Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2016.

MEDEIROS, S. R. P.; FRANÇA, R. L. S. **Um programa para análise não- linear em microcomputadores**. Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1989.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. 221 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

NETO, Ivo Carijo Andrade. **Contribuições à análise da estabilidade global em edifícios de concreto armado com redução brusca de rigidez entre pavimentos**. Universidade de Brasília faculdade de tecnologia Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 2013.

STRAMANDINOLI, Renata Sá Brito. Modelos de elementos finitos para análise não linear física e geométrica de vigas e pórticos planos de concreto armado. Tese de pós graduação, Universidade Federal De Santa Catarina - UFSC, SC, Brasil, 2007.